

①9 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENTAMT

⑫ Gebrauchsmuster  
⑩ DE 296 21 859 U 1

⑤1 Int. Cl.®:  
H 01 S 3/0941

②1	Aktenzeichen:	296 21 859.6
②2	Anmeldetag:	17. 12. 96
④7	Eintragungstag:	24. 4. 97
④3	Bekanntmachung im Patentblatt:	5. 6. 97

DE 296 21 859 U 1

⑦3 Inhaber:

Fuhrberg, Teichmann, Windolph LISA laser products  
oHG, 37191 Katlenburg-Lindau, DE

⑦4 Vertreter:

Rehberg und Kollegen, 37085 Göttingen

⑤4 Diodengepumpter Laser

DE 296 21 859 U 1

Postfach 3162 · D-37021 Göttingen

Dipl.-Ing. Elmar Rehberg  
Dipl.-Phys. Paul W. Hüppe

Ihr Zeichen  
Your ref.

Unser Zeichen  
Our ref.

D-37085 Göttingen  
Am Kirschberge 22

14878 /co6

16.12.1996

Fuhrberg Teichmann Windolph LISA laser products OHG  
37191 Katlenburg-Lindau, Max-Planck-Straße 1

### Diodengepumpter Laser

Die Erfindung bezieht sich auf einen diodengepumpten Laser mit einem langgestreckten stabförmigen Kristall, der der Länge nach zwischen einem Einkoppelspiegel und einem Auskoppelspiegel eines Resonators angeordnet ist, und mit einer eine Vielzahl von Laserdioden aufweisenden Pumpquelle, deren Pumplicht über den Einkoppelspiegel in den Kristall eingekoppelt und durch innere Totalreflektion in dem Kristall geführt wird.

Die Idealvorstellung bei einem Festkörperlaser geht von einem 4-Niveau-System aus. Elektronen der Atome, mit denen der Kristall des Laser dotiert ist, werden von einem unteren Pumpniveau in ein oberes Pumpniveau gepumpt, aus dem sie in ein oberes Laserniveau gelangen, das durch den Pumpvorgang stark bevölkert wird. Aus dem oberen Laserniveau fallen die Elektronen in ein unteres Laserniveau, wobei ein Photon mit der Wellenlänge der gewünschten Laserstrahlung emittiert wird. Aus dem unteren Laserniveau gehen die Elektronen dann wieder in das untere Pumpniveau über.

Bei verschiedenen Dotierungen, beispielsweise bei Thulium oder Holmium liegen das untere Pumpniveau und das untere Laserniveau relativ dicht beieinander, so daß Elektronen aus dem unteren Pumpniveau aufgrund thermischer Anregung in das untere Laserniveau gelangen, beziehungsweise aus dem unteren Laserniveau nicht mehr in das untere Pumpniveau zurückkehren. Dies bedeutet eine relativ starke Bevölkering des unteren Laserniveaus. Hierdurch steigt die Laserschwelle an, weil zur ausreichenden Anregung der dotierten Atome eine größere Anzahl von Elektronen in das obere Laserniveau gepumpt werden muß. Es ist daher von Interesse, eine Erwärmung des Kristalls des Lasers zu vermeiden oder zumindest soweit zu reduzieren, daß thermische Anregungen von dem unteren Pumpniveau in das untere Laserniveau vermeidbar sind. Eine Möglichkeit, das Erwärmen des Kristalls des Lasers zu vermeiden, ist seine Kühlung. Diese Maßnahme reicht jedoch nicht aus, wenn das Pumplicht im Inneren des Kristalls fokussiert wird, weil die Wärmeabfuhr aus dem Fokus viel zu langsam ist, um dort einer Wärmeentwicklung im erforderlichen Maße entgegenzuwirken. Eine andere Maßnahme ist es, das Pumplicht nicht nur an einer Stelle, beispielsweise in einem Fokuspunkt, auf den dotierten Kristall des Lasers einwirken zu lassen, sondern mehrere Pumpzentren vorzusehen. Ein Beispiel hierfür sind transversal diodengepumpte Laser mit einem langgestreckten stabförmigen Kristall, der der Länge nach in einem Resonator angeordnet ist und in den das Pumplicht seitlich, das heißt transversal eingekoppelt wird. Dabei wird Pumplicht mit einer Wellenlänge im Bereich der Absorptionsmaxima der Dotierung des Kristalls verwendet, damit möglichst kein Pumplicht wieder seitlich aus dem Kristall austritt. Der Anfall der Wärmeenergie durch das Pumpen wird so zwar auf mehrere Punkte des Kristalls verteilt. Es besteht aber immer noch die Gefahr stärkerer lokaler Erwärmungen, zumal die seitliche Kühlung des Kristalls durch die Zuführung des Pumplichts behindert wird, auch wenn hierzu Lichtleiterfasern verwendet werden.

Ein Laser der eingangs beschriebenen Art ist aus der US-Z SPIE Vol. 2698 Seiten 168 bis 175 "High power 2  $\mu$ m diode pumped

Tm:YAG laser" bekannt. Hier wird das Pumplicht über den Einkoppelspiegel longitudinal in den Kristall eingekoppelt und in dem Kristall durch Totalreflexion an den Wänden des Kristalls geführt. Wenn dabei die Wellenlänge des Lichts etwas oberhalb eines Absorptionsmaximums der Dotierungsatome gewählt wird, erfolgt das Pumpen der Dotierungsatome nicht nur in dem an den Einkoppelspiegel angrenzenden Bereich des Kristalls, sondern das Pumplicht verteilt sich über den Kristall und regt in allen Bereichen des Kristalls Dotierungsatome an. Hierdurch wird die Wärmeentwicklung durch das Pumpen gleichmäßig über den Kristall verteilt. Gleichzeitig ist eine seitliche Kühlung des Kristalls problemlos. Um die Wärmeentwicklung in von der Kühlung nicht erfaßten Bereichen des Kristalls gegen null zu bringen, wird vorgeschlagen, dort undotierte Kristallabschnitte vorzusehen, die durch Diffusion-Bonding mit dotierten Kristallabschnitten verbunden sind.

Bei dem bekannten Laser der eingangs beschriebenen Art wird das Pumplicht von Laserdioden geliefert, die in einem Diodenstack angeordnet sind. Vor jeder Lage des Diodenstacks ist eine aus einer Glasfaser ausgebildete Mikrolinse angeordnet, mit der die Divergenz des von den Laserdioden abgestrahlten Laserlichts senkrecht zur Haupterstreckungsrichtung der Zylinderlinsen reduziert wird. Das Laserlicht wird anschließend über einen optischen Trichter mit verspiegelten Wänden an den Einkoppelspiegel geführt, der direkt auf dem einen Ende des Kristalls aufgebracht ist. Durch den hohen Brechungsindex des Kristalls ist die am Ende des Lichttrichters auftretende Divergenz des Pumplichts unkritisch und das Pumplicht kann nahezu vollständig in den Kristall eingekoppelt werden.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, den bekannten Laser der eingangs beschriebenen Art weiterzuentwickeln, um seine Handhabbarkeit zu erhöhen. Insbesondere wird die Möglichkeit angestrebt, das Laserlicht in einem Handstück zu erzeugen. Dies ist beispielsweise bei Laserlicht mit einer Wellenlänge von circa 3  $\mu\text{m}$  interessant, da hierfür derzeit noch keine Licht-

leiterfasern zur Verfügung stehen, die den problemlosen Einsatz solchen Laserlichts zu medizinische Zwecken ermöglichen würden.

Die Aufgabe der Erfindung wird dadurch gelöst, daß das Pumplicht der Pumpquelle von den Laserdioden mit einem Lichtleiterfaserbündel zu einer Optik geführt wird, die das Pumplicht über den Einkoppelspiegel in den Kristall einkoppelt. Durch die Erfindung wird die starre Verbindung aufgehoben, die im Stand der Technik durch den Lichttrichter zwischen den Laserdioden und dem Einkoppelspiegel bestand. So können die Laserdioden bei dem neuen Laser mit größerem Abstand zu der Optik und dem Resonator mit dem Kristall angeordnet werden. Eine Verbindung besteht nur noch durch das Lichtleiterfaserbündel. Die Optik und der Resonator mit dem Kristall können ohne weiteres in einem Handstück untergebracht werden. Dabei muß das Handstück nicht notwendiger Weise über eine aktive Kühlung mittels Kühlflüssigkeit verfügen, sondern häufig reicht eine passive Kühlung über einen die anfallende Wärme abführenden Quarzmantel aus. Der Aufbau des neuen Lasers bezüglich der Pumpquelle ist problemlos. Es sind fasergekoppelte Laserdioden handelsüblich, bei denen das Laserlicht von einer Mehrzahl von Einzeldioden zunächst über Lichtleiterfasern einer Zwischenoptik zugeführt werden, von der das gesamte Laserlicht dann in eine Ausgangslichtleiterfaser einkoppelt wird. Mehrere solcher Ausgangslichtleiterfasern können bei dem neuen Laser zu dem Lichtleiterfaserbündel zusammengefaßt werden, mit dem das Laserlicht der Laserdioden als Pumplicht zu dem Kristall geführt wird.

Der Aufbau des neuen Lasers weist nur scheinbar Übereinstimmungen mit dem Aufbau eines aus der WO 95 /21 478 bekannten Lasers auf. Dort wird zwar auch von einer Laserdiode kommendes Laserlicht über eine Lichtleiterfaser und eine Optik sowie einen Einkoppelspiegel in einen Kristall einkoppelt, der zwischen dem Einkoppelspiegel und einem Auskoppelspiegel als Resonator angeordnet ist. Hier handelt es sich jedoch um einen konfokalen Laseraufbau, das heißt das Pumplicht wird gezielt auf einen Teilbereich des Kristalls fokussiert, wodurch eine lokale

Erwärmung des Kristalls in diesem Bereich nicht verhindert werden kann. Demgegenüber wird bei der Erfindung möglichst der gesamte Kristall von dem Pumplicht erfaßt.

Bei dem Kristall des erfindungsgemäßen Laser kann es sich um einen Tm:YAG-Kristall, einen Tm, Ho:YAG-Kristall, einen Tm:YLF-Kristall oder einen Tm, Ho:YLF-Kristall handeln, wobei das Pumplicht Wellenlänge in dem Bereich von 800 bis 810 nm aufweist. Die genannten Kristalle weisen ein Absorptionsmaximum bei Wellenlänge von 780 bis 790 nm auf. Wenn die Kristalle mit einem Pumplicht mit Wellenlänge in dem Bereich von 800 bis 810 nm gepumpt werden, ist die Reichweite des Pumplichts in dem Kristall vergleichsweise groß. Im Ergebnis kann sich das Pumplicht vor seiner Absorption über den gesamte Kristall verteilen, wodurch auch das Pumpen in dem gesamten Kristall erfolgt.

Die vorgenannten speziellen Kristalle führen zu einer Laserausgangsstrahlung von circa 2  $\mu\text{m}$  Wellenlänge. Ein ER:YAG-Kristall ergibt eine Wellenlänge von etwa 3  $\mu\text{m}$  bei der Laserausgangsstrahlung. Auch hier liegen die geeigneten Wellenlänge für das Pumplicht mit 960 bis 970 nm oberhalb eines Absorptionsmaximums des Kristalls.

Als Alternative oder zusätzliche Maßnahme zu der gegenüber einem Absorptionsmaximum des Kristalls erhöhten Wellenlänge des Pumplichts kann das Pumplicht eine spektrale Bandbreite von 5 bis 10 nm aufweisen. Wenn sich diese spektrale Bandbreite nach oben an ein Absorptionsmaximum des jeweiligen Kristalls anschließt, so werden tendenziell die kurzwelligen Anteile des Pumplichts in den dem Einkoppelspiegel nahen Bereichen des Kristalls absorbiert, während die langwelligen Anteile tiefer in den Kristall eindringen, bevor sie absorbiert werden.

Eine weitere alternativ oder zusätzlich anzuwendende Maßnahme, um das Pumpen der dotierten Atome in möglichst allen Bereichen des Kristalls zu erreichen, besteht darin, dem Kristall eine zwischen dem Einkoppelspiegel und dem Auskoppelspiegel zuneh-

mende Dotierungskonzentration zu geben. Auch hierdurch wird sichergestellt, daß nicht das gesamte Pumplicht direkt hinter dem Einkoppelspiegel absorbiert wird, sondern auch die dahinter befindlichen Teile des Kristalls erreicht. Umgekehrt sorgt die zunehmende Dotierung in Richtung auf den Auskoppelspiegel dafür, daß möglichst wenig Pumplicht bis zu dem anderen Ende des Kristalls gelangt und dort möglicherweise aus dem Kristall austritt.

Unabhängig von der zuletzt beschriebenen zunehmenden Dotierungskonzentration zwischen dem Einkoppelspiegel und dem Auskoppelspiegel kann der Kristall in endseitigen Lagerbereichen eine minimale oder bei null liegende Dotierungskonzentration aufweisen. Wie aus dem Stand der Technik bekannt, wird hierdurch vermieden, daß sich der Kristall in den endseitigen Lagerbereichen durch den Pumpvorgang aufheizt, obwohl er dort durch seine Lagerung nicht direkt gekühlt werden kann. Ebenso wie undotierte endseitige Lagerbereiche des Kristalls mit dotierten Teilen des Kristalls durch Diffusion-Bonding verbunden werden können, kann eine zwischen dem Einkoppelspiegel und dem Auskoppelspiegel zunehmende Dotierungskonzentration durch Diffusion-Bonding verschieden dotierter Kristallabschnitte erreicht werden. Alternativ kann durch die Führung des Herstellungsverfahrens eine stetig verlaufende Konzentrationsänderung über den Kristall erreicht werden.

Der Einkoppelspiegel wird bei dem neuen Laser vorzugsweise von einer direkt auf eine Stabendfläche aufgebrachten Beschichtung ausgebildet. Hiermit wird sichergestellt, daß der hohe Brechungsindex des Kristalls voll ausgenutzt werden kann, um auch Pumplicht, welches mit höherer Divergenz von der Optik bereitgestellt wird, vollständig in den Kristall einzukoppeln.

Der Auskoppelspiegel des neuen Lasers kann plan oder gekrümmt sein. Bevorzugt ist eine gekrümmte Ausbildung mit einem Krümmungsradius von mindestens 100 mm um die Qualität der Laserausgangsstrahlung durch Beeinflussung der Resonatormoden zu

mende Dotierungskonzentration zu geben. Auch hierdurch wird sichergestellt, daß nicht das gesamte Pumplicht direkt hinter dem Einkoppelspiegel absorbiert wird, sondern auch die dahinter befindlichen Teile des Kristalls erreicht. Umgekehrt sorgt die zunehmende Dotierung in Richtung auf den Auskoppelspiegel dafür, daß möglichst wenig Pumplicht bis zu dem anderen Ende des Kristalls gelangt und dort möglicherweise aus dem Kristall austritt.

Unabhängig von der zuletzt beschriebenen zunehmenden Dotierungskonzentration zwischen dem Einkoppelspiegel und dem Auskoppelspiegel kann der Kristall in endseitigen Lagerbereichen eine minimale oder bei null liegende Dotierungskonzentration aufweisen. Wie aus dem Stand der Technik bekannt, wird hierdurch vermieden, daß sich der Kristall in den endseitigen Lagerbereichen durch den Pumpvorgang aufheizt, obwohl er dort durch seine Lagerung nicht direkt gekühlt werden kann. Ebenso wie undotierte endseitige Lagerbereiche des Kristalls mit dotierten Teilen des Kristalls durch Diffusion-Bonding verbunden werden können, kann eine zwischen dem Einkoppelspiegel und dem Auskoppelspiegel zunehmende Dotierungskonzentration durch Diffusion-Bonding verschieden dotierter Kristallabschnitte erreicht werden. Alternativ kann durch die Führung des Herstellungsverfahrens eine stetig verlaufende Konzentrationsänderung über den Kristall erreicht werden.

Der Einkoppelspiegel wird bei dem neuen Laser vorzugsweise von einer direkt auf eine Stabendfläche aufgebrachten Beschichtung ausgebildet. Hiermit wird sichergestellt, daß der hohe Brechungsindex des Kristalls voll ausgenutzt werden kann, um auch Pumplicht, welches mit höherer Divergenz von der Optik bereitgestellt wird, vollständig in den Kristall einzukoppeln.

Der Auskoppelspiegel des neuen Lasers kann plan oder gekrümmt sein. Bevorzugt ist eine gekrümmte Ausbildung mit einem Krümmungsradius von mindestens 100 mm um die Qualität der Laserausgangsstrahlung durch Beeinflussung der Resonatormoden zu



verbessern.

Als weitere Maßnahme zur Verbesserung der Strahlqualität der Laserausgangsstrahlung kann der Resonator eine Vorrichtung zur Modenkopplung aufweisen. Zur Steigerung der Spitzenleistung der Laserausgangsstrahlung kann auch eine Vorrichtung zur Güteschaltung vorgesehen sein.

Die Laserausgangsstrahlung kann im Anschluß an den Auskoppelspiegel in einen wasserarmen oder wasserfreien Lichtwellenleiter, insbesondere in eine Quarz-Quarz-Faser, eingekoppelt werden. Vorzugsweise wird dabei eine sich zwischen Ihrem proximalen Ende und Ihrem distalen Ende verjüngende Quarz-Quarz-Faser verwendet. Quarz-Quarz-Fasern weisen bei Wellenlänge im Bereich von 2  $\mu\text{m}$  einen ausreichend großen Transmissionskoeffizienten auf, so daß eine Führung der Laserausgangsstrahlung mit geringer Dämpfung auch über größere Faserlängen von 1 bis 3 m möglich ist. Durch die Verjüngung der Quarz-Quarz-Faser beispielsweise von 600  $\mu\text{m}$  auf 60  $\mu\text{m}$  wird einerseits erreicht, daß die Laserausgangsstrahlung besonders einfach in die vergleichsweise große proximale Endfläche den Lichtwellenleiter eingekoppelt werden kann, während gleichzeitig die Laserausgangsstrahlung an der distalen Endfläche in konzentrierter Form zur Verfügung steht.

Die Erfindung wird im folgenden anhand von Ausführungsbeispielen näher erläutert und beschrieben, dabei zeigt:

Figur 1 den prinzipiellen Aufbau des diodengepumpten Lasers,

Figur 2 einen weiterentwickelten Aufbau des diodengepumpten Lasers,

Figur 3 einen Querschnitt durch einen konkreten Aufbau des diodengepumpten Lasers,

Figur 4 den prinzipiellen Aufbau der Pumpquelle des dioden-

gepumpten Lasers,

Figur 5 das Absorptionsspektrum eines Tm:YAG-Kristalls und

Figur 6 die Auftragung verschiedener Dotierungskonzentrationen über die Länge des Kristalls des diodengepumpten Lasers.

Der in Figur 1 schematisch dargestellte Laser 1 ist ein Festkörperlaser, der auf einem mit Thulium dotierten YAG-Kristall 2 basiert. Der Kristall 2 ist seiner Länge nach in einem Resonator 3, 4 angeordnet, der einen Einkoppelspiegel 3 und einen Auskoppelspiegel 4 aufweist. Der Einkoppelspiegel 3 ist direkt als Beschichtung auf einer Endfläche 5 des Kristalls 2 aufgebracht, der Auskoppelspiegel 4 befindet sich mit Abstand vor der anderen Endfläche 6 des Kristalls 2. In Abstimmung auf dem verwendeten Kristall 2 sind die charakteristischen Daten des Einkoppelspiegels 3 HT bei 780 bis 820 nm und HR bei 2050 nm. Der Kristall 2 weist entgegen der schematischen Darstellung in Figur 1 einen typische Durchmesser von 2 bis 3 mm und eine Länge von 50 mm und mehr auf. Der Kristall 2 ist in einen Kühlmantel 7 eingebettet, bei dem es sich um Kühlwasser aber beispielsweise auch um eine wärmeableitende Quarzbeschichtung handeln kann. Die aus dem Auskoppelspiegel 4 des Lasers 1 austretende Laser- ausgangsstrahlung 8 wird durch die Resonatormoden 9 des Resonators 3, 4 bestimmt. Das Pumplicht, mit dem der Kristall 2 angeregt wird, stammt von hier nicht dargestellten Laserdioden und wird über ein Lichtleiterfaserbündel 10 an eine dem Einkoppelspiegel 3 vorgeschaltete Optik 11 herangeführt. Mit der Optik wird das Pumplicht 12 über den Einkoppelspiegel 3 in den Kristall 2 eingekoppelt. Dabei ist eine gewisse Divergenz des Pumplichts 12 unerheblich, weil der Kristall 2 aufgrund seines hohen Brechungsindex einen großen, gestrichelt dargestellten Akzeptanzbereich 13 für einzukoppelndes Pumplicht aufweist. In dem Kristall 2 wird das Pumplicht 12 durch Totalreflektion geführt. Auch hierfür ist der große Brechungsindex des Kristalls 2 relativ zu dem Brechungsindex des Kühlmantels 7 aus Kühlwasser

oder Quarz von Bedeutung. Weiterhin ist die Endfläche 6 des Kristalls 2 mit einer reflektierenden Beschichtung 14 versehen. Aufgrund ihrer Charakteristika, HR bei 790 bis 820 nm und AR bei 2050 nm, läßt die Beschichtung zwar kein Pumplicht 12 aus dem Kristall 2 austreten, die Resonatormoden 9 jedoch unbeeinflußt.

Bei geeigneter Abstimmung der Wellenlänge des Pumplichts 12 auf die Dotierung des Kristalls 2 wird der Kristall 2 über sein gesamtes Volumen gepumpt. Dies bedeutet eine breite Verteilung des mit den Pumpen verbundenen Anfalls von Wärmeenergie, wodurch nennenswerte Erwärmungen des Kristalls 2 auch lokal vermieden werden. Hierdurch kann die Laserschwelle eines Thulium dotierten Kristalls 2 deutlich niedriger gehalten werden, als wenn beispielsweise das untere Laserniveau durch thermische Anregung von dem unteren Pumpniveau her bevölkert wird.

Die in Figur 1 dargestellten Bestandteile des Lasers 1 können problemlos in einem Handstück angeordnet werden, das den Einsatz der Laserausgangsstrahlung 8 beispielsweise für medizinische Zwecke ermöglicht. Hierfür ist Laserausgangsstrahlung 8 mit einer Wellenlänge von circa  $2\text{ }\mu$ , wie sie bei einem Thulium dotierten YAG-Kristalls anfällt, gut geeignet, da sie einerseits als augensicher gilt und andererseits von Wasser, dem Hauptbestandteil der meisten Körpergewebe stark absorbiert wird. Besondere Vorteile weist die Integration des Lasers 1 in ein Handstück jedoch bei Verwendung eines Erbium dotierten Kristalls 2 auf, der in eine Laserausgangsstrahlung 8 von etwa  $3\text{ }\mu$ m Wellenlänge resultiert. Für eine derartige Laserausgangsstrahlung stehen derzeit keine brauchbaren Lichtleiterfasern zur Verfügung. Mit der Integration des Lasers 1 in ein Handstück kann die Laserausgangsstrahlung 8 in diesem Fall ohne weitere Leitung durch eine Lichtleiterfaser medizinisch angewandt werden. Geleitet wird nur das unkritische Pumplicht 12 durch das Lichtleiterfaserbündel 10.

Der in Figur 2 dargestellte prinzipielle Aufbau eines Lasers 1 weicht von denjenigen gemäß Figur 1 durch das Weglassen einiger

Details ab. Dafür ist aber die Einkopplung der Laserausgangsstrahlung 8 in einen Lichtwellenleiter 15 mittels einer Optik 16 dargestellt. Weiterhin ist in dem Resonator 3, 4 zusätzlich eine Vorrichtung 17 vorgesehen, die zur Güteschaltung oder Modenkopplung dient, um die Spitzenleistung der Laserausgangsstrahlung 8 zu steigern bzw. deren Strahlqualität zu verbessern. Der Lichtwellenleiter 15 ist bei einer Laserausgangsstrahlung 8 mit einer Wellenlänge von circa  $2\text{ }\mu\text{m}$ , also beispielsweise im Fall einer Dotierung des Kristalls 2 mit Thulium, vorzugsweise eine wasserarme oder wasserfreie Quarz-Quarz-Faser. Zum Erleichtern des Einkoppelns der Laserausgangsstrahlung 8 in den Lichtwellenleiter 15 kann dieser eine hier nicht dargestellte Verjüngung zwischen seinem proximalen Ende 18 und seinem distalen Ende 19 aufweisen. Die sich so ergebende große distale Endfläche erleichtert das Einkoppeln von Laserausgangsstrahlung mit gewisser Divergenz in den Lichtwellenleiter 15. Gleichzeitig wird die Laserausgangsstrahlung 8 bis zum distalen Ende 10 auf die dort kleinere Endfläche konzentriert. Das Durchmesser Verhältnis zwischen dem proximalen Ende 18 und dem distalen Ende 19 kann etwa 10 zu 1 betragen. Bei voller Ausnutzung der proximalen Endfläche bedeutet dies eine Konzentration der Laserausgangsstrahlung durch den Lichtwellenleiter 15 um einen Faktor 100.

Figur 3 zeigt einen Längsschnitt durch eine Halterung 20 für den Kristall 2. Die Halterung 20 umgibt auch den hier aus Kühlwasser ausgebildeten Kühlmantel 7. Die Halterung 20 besteht im wesentlichen aus einem Gehäuse 21, an dem Anschlüsse 22 für das Kühlwasser angebracht sind. In dem Gehäuse sind Leitungen 23 für das Kühlwasser ausgebildet. Gelagert ist der Kristall 20 an den Stirnflächen des Gehäuses 21. An der Eintrittsseite des Pumplichts 12 ist eine Lagerplatte 22 auf das Gehäuse 21 aufgeschraubt. Die Dichtungen für die Lagerplatte 22 werden durch einen vergoldeten Führtrichter 23 für das Pumplicht 12 vor dem Pumplicht 12 geschützt. An der dem Auskoppelspiegel 4, für den hier eine Halterung 24 vorgesehen ist, zugewandten Stirnseite des Gehäuses 21 wird der Kristall 2 durch ein Lagerelement

25 und eine Halteplatte 26 fixiert. Die Platten 22 und 26 sind jeweils über Schrauben 27 an dem Gehäuse 21 befestigt. Die Optik 11 für das Pumplicht 12 ist hier in Form zweier Einzellinsen wiedergegeben.

Figur 4 zeigt ein Detail einer das Pumplicht 12 bereitstellenden Pumpquelle 28. Auf einem gekühlten Träger 29 angeordnete Laserdioden 30 koppeln ihr Laserlicht in Lichtleiterfasern 31 ein. Diese Lichtleiterfasern 31 werden zu einem Lichtleiterfaserbündel 32 zusammengefaßt. Das von dem Lichtleiterfaserbündel 32 geführte Laserlicht 33 wird mit einer Zwischenoptik 34 in eine einzelne Ausgangslichtleiterfaser 35 eingekoppelt. Mehrere Ausgangslichtleiterfasern 35 werden zu dem Lichtleiterfaserbündel 10 gemäß den Figuren 1 bis 3 zusammengefaßt. Die in Figur 4 gestrichelt umrandete Baueinheit 36 ist beispielsweise als fasergekoppelter Diodenlaser der Firma Jenoptik als Typ JOLD-10-CAXF-1L verfügbar und weist eine Ausgangsleistung von mehr als 10 Watt auf. Wenn die Lichtleiterfasern 35 zehn solcher Diodenlaser zu dem Lichtleiterfaserbündel 10 zusammengefaßt werden, ergibt sich eine Gesamtleistung des Pumplichts 12 von über 100 Watt.

Figur 5 zeigt das Absorptionsspektrum eines Thulium dotierten YAG-Kristalls, wobei die Absorption in dimensionslosen relativen Einheiten über der Wellenlänge aufgetragen ist. Zu erkennen ist, daß bei Wellenlänge von 775 bis 785 nm ein Absorptionsmaximum vorliegt. Bei dem Betrieb des Lasers gemäß den Figuren 1 bis 3 wird gezielt Pumplicht 12 mit einer Wellenlänge von 800 bis 810 nm verwendet, welches nicht so stark absorbiert wird wie Licht mit einer etwas kürzeren Wellenlänge. Im Ergebnis konzentriert sich das Pumpen des Kristalls 2 nicht auf den Bereich direkt hinter dem Einkoppelspiegel 3 sondern erfaßt den gesamten Kristall 2.

In Figur 6 sind weitere Maßnahmen skizziert, um das Pumpen durch das Pumplicht 12 gleichmäßig über den Kristall 2 zu verteilen. In Figur 6 ist die Dotierungskonzentration  $c$  des Kristalls 2

SCHUTZANSPRÜCHE:

1. Diodengepumpter Laser mit einem langgestreckten stabförmigen Kristall, der der Länge nach zwischen einem Einkoppelspiegel und einem Auskoppelspiegel eines Resonators angeordnet ist, und mit einer eine Vielzahl von Laserdioden aufweisenden Pumpquelle, deren Pumplicht über den Einkoppelspiegel in den Kristall eingekoppelt und durch innere Totalreflexion in dem Kristall geführt wird, dadurch gekennzeichnet, daß das Pumplicht (12) der Pumpquelle (28) von den Laserdioden (30) mit einem Lichtleiterfaserbündel (10) zu einer Optik (11) geführt wird, die das Pumplicht (12) über den Einkoppelspiegel (3) in den Kristall (2) einkoppelt.
2. Laser nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der Kristall (2) ein Tm:YAG-Kristall, ein Tm, Ho:YAG-Kristall, ein Tm:YLF-Kristall oder ein Tm, Ho:YLF-Kristall ist und daß das Pumplicht (12) Wellenlänge in dem Bereich von 800 bis 810 nm aufweist.
3. Laser nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der Kristall (2) ein Er:YAG-Kristall ist und daß das Pumplicht (12) Wellenlänge in dem Bereich von 960 bis 970 nm aufweist.
4. Laser nach Anspruch 1, 2 oder 3, dadurch gekennzeichnet, daß das Pumplicht (12) eine spektrale Bandbreite von 5 bis 10 nm aufweist.
5. Laser nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß der Kristall (2) eine zwischen dem Einkoppelspiegel (3) und dem Auskoppelspiegel (4) zunehmende Dotierungskonzentration c aufweist.

SCHUTZANSPRÜCHE:

1. Diodengepumpter Laser mit einem langgestreckten stabförmigen Kristall, der der Länge nach zwischen einem Einkoppelspiegel und einem Auskoppelspiegel eines Resonators angeordnet ist, und mit einer eine Vielzahl von Laserdioden aufweisenden Pumpquelle, deren Pumplicht über den Einkoppelspiegel in den Kristall eingekoppelt und durch innere Totalreflexion in dem Kristall geführt wird, dadurch gekennzeichnet, daß das Pumplicht (12) der Pumpquelle (28) von den Laserdioden (30) mit einem Lichtleiterfaserbündel (10) zu einer Optik (11) geführt wird, die das Pumplicht (12) über den Einkoppelspiegel (3) in den Kristall (2) einkoppelt.
2. Laser nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der Kristall (2) ein Tm:YAG-Kristall, ein Tm, Ho:YAG-Kristall, ein Tm:YLF-Kristall oder ein Tm, Ho:YLF-Kristall ist und daß das Pumplicht (12) Wellenlänge in dem Bereich von 800 bis 810 nm aufweist.
3. Laser nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der Kristall (2) ein Er:YAG-Kristall ist und daß das Pumplicht (12) Wellenlänge in dem Bereich von 960 bis 970 nm aufweist.
4. Laser nach Anspruch 1, 2 oder 3, dadurch gekennzeichnet, daß das Pumplicht (12) eine spektrale Bandbreite von 5 bis 10 nm aufweist.
5. Laser nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß der Kristall (2) eine zwischen dem Einkoppelspiegel (3) und dem Auskoppelspiegel (4) zunehmende Dotierungskonzentration  $c$  aufweist.

6. Laser nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, daß Kristall (2) in endseitigen Lagerbereichen (38, 39) eine minimale oder bei null liegende Dotierungskonzentration aufweist.

7. Laser nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, daß der Einkoppelspiegel (3) von einer direkt auf eine Stabendfläche aufgetragenen Beschichtung ausgebildet wird.

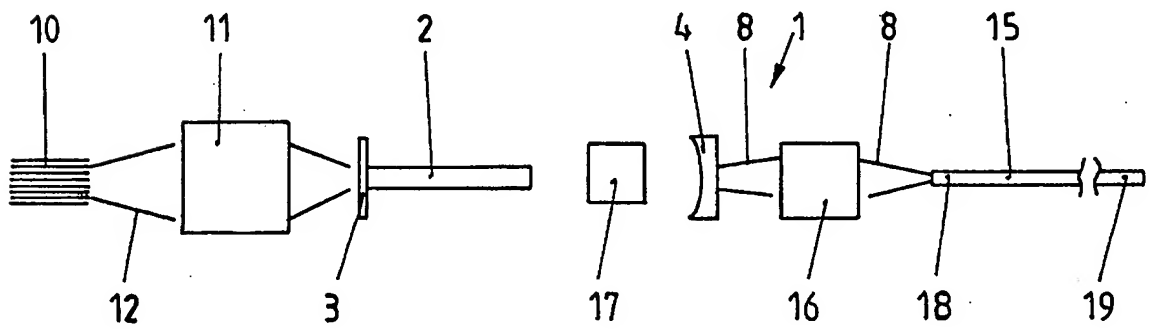
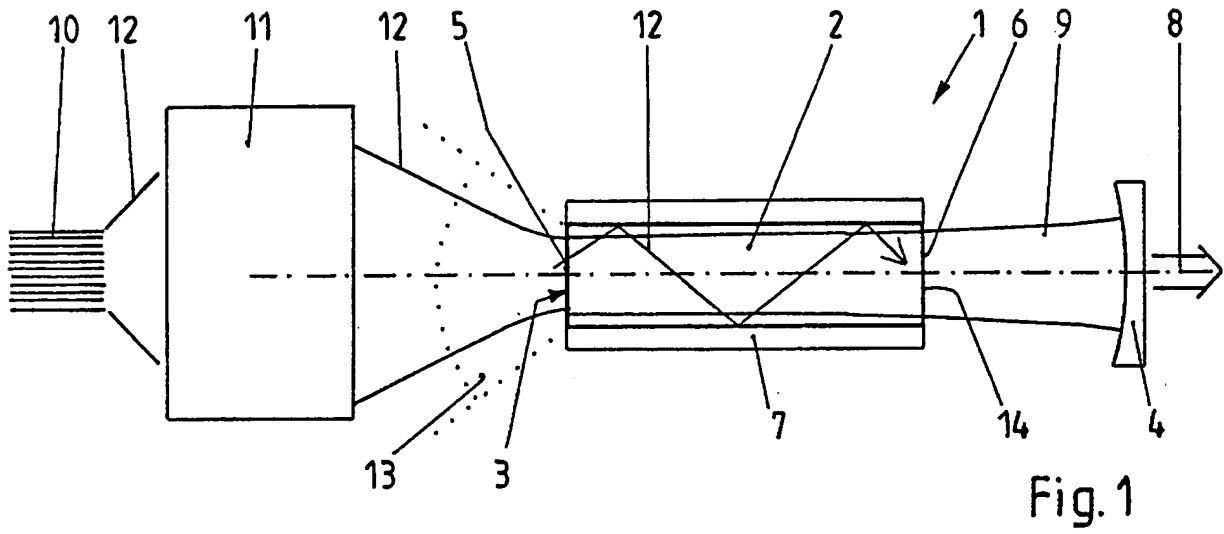
8. Laser nach einem der Ansprüche 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, daß der Auskoppelspiegel (4) gekrümmt ist.

9. Laser nach einem der Ansprüche 1 bis 8, dadurch gekennzeichnet, daß der Resonator (3, 4) eine Vorrichtung (17) zur Güteschaltung oder zur Modenkopplung aufweist.

10. Laser nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß die Laserausgangsstrahlung (8) im Anschluß an den Auskoppelspiegel (4) in einen wasserarmen oder wasserfreien Lichtwellenleiter (15), insbesondere in eine Quarz-Quarz-Faser, eingekoppelt wird.



1/3



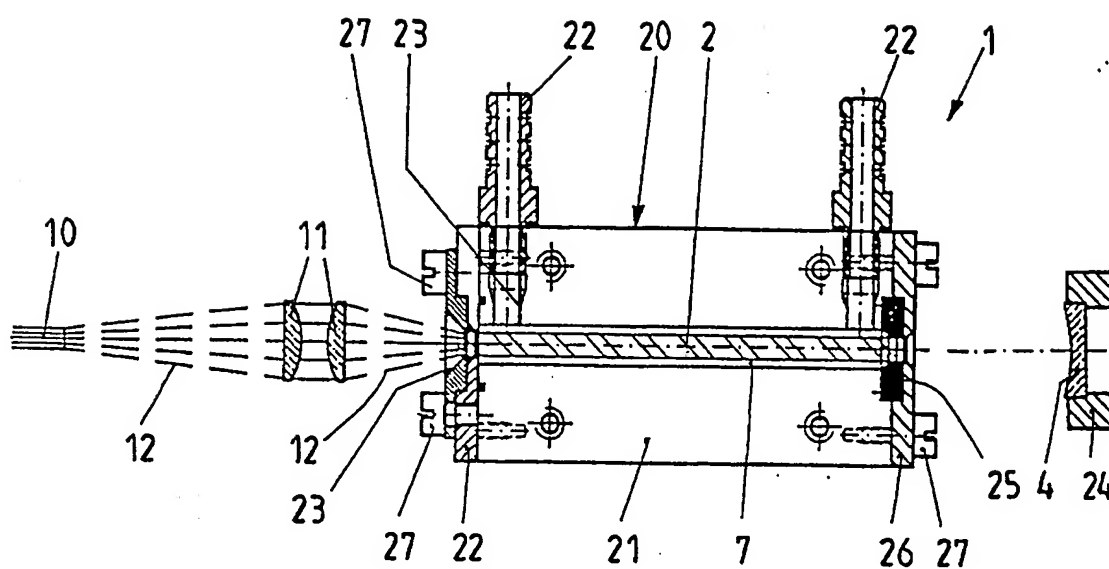


Fig. 3

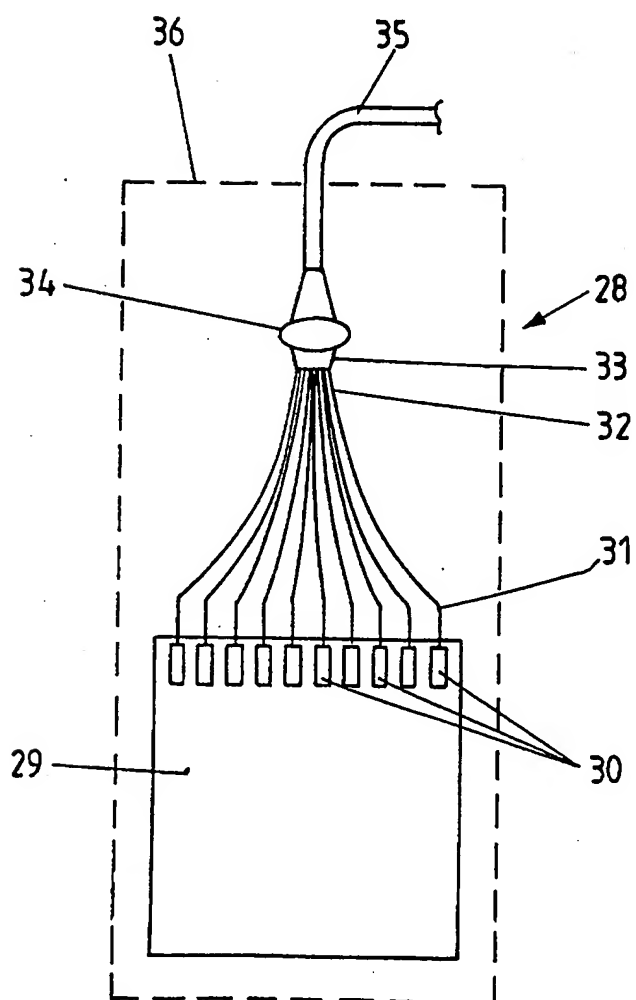


Fig. 4

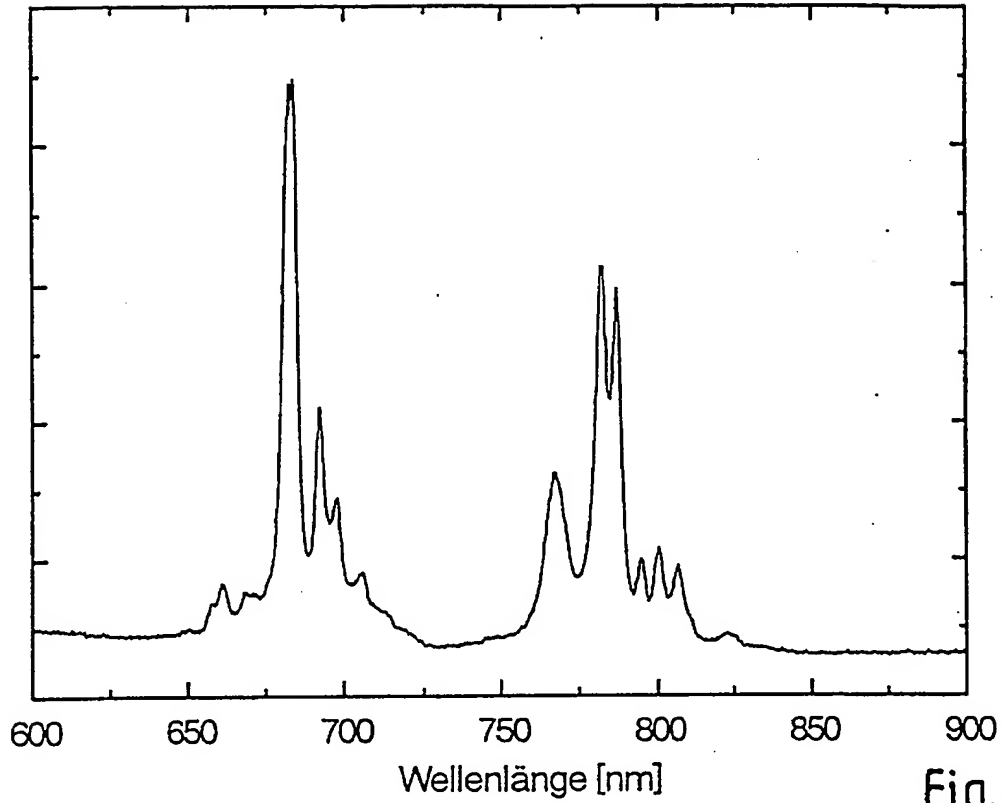


Fig. 5

